



УДК: 621.313

3.6. МОЩНОСТЬ В МНОГОФАЗНЫХ ЦЕПЯХ POLYPHASE CIRCUITS POWER

Омельченко Евгений Яковлевич, профессор каф. АЭПиМ ФГБОУ ВПО МГТУ, д.т.н., 455038, Магнитогорск, пр.К.Маркса, 164/1 - 82, тел. +7 3519 296840, E-mail: momentum2@yandex.ru

Енин Сергей Сергеевич, аспирант каф. АЭПиМ ФГБОУ ВПО МГТУ, 455038, Магнитогорск, пр.К.Маркса, 119/1-11, тел. +7 903 091 3440, E-mail: enin_ss@mail.ru

Танич Василий Олегович, магистрант каф. АЭПиМ ФГБОУ ВПО МГТУ, 455038, Магнитогорск, пр.К.Маркса, 164/1 - 82, тел. +7 3519 296840, E-mail: momentum2@yandex.ru

Evgenii I. Omelchenko, Doctor of Engineering Sciences, Magnitogorsk State Technical University named after G.I.Nosov, 455038, K.Marx av. 164/1 – 82, Magnitogorsk, Russia.

E-mail: momentum2@yandex.ru

Sergei S. Enin, Postgraduate student, Magnitogorsk State Technical University named after G.I.Nosov, 455038, K.Marx av. 119/1 – 11, Magnitogorsk, Russia. E-mail: enin_ss@mail.ru

Vasilii O. Tanich, Master's Degree student, Magnitogorsk State Technical University named after G.I.Nosov, 455038, K.Marx av. 164/1 – 82, Magnitogorsk, Russia.

E-mail: momentum2@yandex.ru

Аннотация: Выведены уравнения суммарных составляющих полной мощности многофазных цепей, определены передаточные функции активной и реактивной мощностей для многофазной L-R нагрузки, приведены исходные параметры и расчетные переменные нагрузки, получены переходные процессы суммарной активной, реактивной, полной мощности и модуля трехфазного тока при изменении параметров L и R симметричной трехфазной нагрузки.

Abstract: The expressions for components of multiphase circuits total power are deduced, the transfer functions of active and reactive power for multi-phase L-R load are determined, initial parameters and calculated variables of the load are given, transients of active, reactive, total power and three phase current module with changing parameters L and R are obtained for symmetrical three-phase load.

Ключевые слова: полная, активная, реактивная мощность; мощность искажения; мощность несимметрии; коэффициент мощности; переходные процессы мощности.

Key words: total power; active power, reactive power, distortion power; asymmetry power, power factor, transients of power.

ВВЕДЕНИЕ

Регулируемые электроприводы переменного тока получили главенствующее применение на промышленных предприятиях, поэтому изучение поведения мощности в многофазных цепях с целью управления и диагностирования электроприводов является актуальной научно-технической задачей.

Основные составляющие полной мощности: активная, реактивная, искажения и мощность несимметрии.

Полная мощность S определяет расчетные токи и напряжения сети, она всегда больше фактически передаваемой нагрузке активной мощности из-за существования неактивных составляющих мощности, которые, не создавая полезной работы, приводят к увеличению потерь в нагрузке,

питающей сети и источнике напряжения. Полная мощность равна наибольшему возможному значению той активной мощности, которая может быть передана нагрузке при отсутствии неактивных составляющих мощности [1]

$$S_3 = 3U_{A1}I_A$$

Для полной мощности трехфазной нагрузки предлагается формула

$$S_3 = \sqrt{P_3^2 + Q_3^2 + T_3^2 + H_3^2}. \quad (1)$$

Активная мощность P равна среднему значению мгновенной мощности за период питающего напряжения и определяет количество электромагнитной энергии, необратимо преобразующейся за секунду в тепло или другие формы энергии. В электроприводе она

характеризует полезную работу в нагрузке, включая полезную мощность и мощность потерь.

Реактивная мощность или мощность сдвига Q обусловлена сдвигом по фазе основной гармоники тока нагрузки относительно первой гармоники напряжения питающей сети. Появляется реактивная составляющая тока, которая не участвует в передаче активной мощности нагрузке, так как среднее арифметическое мгновенной мощности за период питания от этой составляющей равно нулю. В то же время, протекая от источника питания к нагрузке или обратно, реактивная составляющая тока создает дополнительные потери активной мощности, энергии и потери напряжения в сети.

Мощность искажения T - это составляющая полной мощности, обусловлена протеканием гармоник тока, не совпадающих по частоте с напряжением сети и может иметь низкочастотную и высокочастотную составляющие. Хотя среднее арифметическое мгновенной мощности, связанной с этими гармониками, за период питающего напряжения равно нулю, но они вызывают дополнительные потери энергии в сети.

Мощность несимметрии H - это составляющая полной мощности, которая возникает только в многофазных цепях, учитывает дополнительные потери энергии, связанные с неравномерным распределением тока по фазам. Если потери в фазе пропорциональны квадрату тока, то уменьшение тока в одной фазе за счет других фаз приводит к увеличению суммарных потерь. При соблюдении условий симметрии мощность несимметрии равна нулю.

Коэффициент мощности трехфазного устройства равен отношению активной мощности к полной

$$k_{M3} = P_3 / S_3 = P_3 / \sqrt{P_3^2 + Q_3^2 + T_3^2 + H_3^2}.$$

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ МОЩНОСТИ

Уравнение (1) носит условный характер, так как только активная мощность имеет ненулевое значение средней мощности за период питающего напряжения, а поведение мгновенных значений суммарных мощностей в трехфазной сети практически не изучены.

Материалы статьи посвящены изучению поведения суммарных составляющих полной мощности в многофазных (2 и более) цепях.

В операторном виде передаточная функция мгновенной потребляемой суммарной активной мощности на симметричную L-R нагрузку [2] равна

$$W_{P3}(s) = \frac{P_3(s)}{U_m^2(s)} = \frac{3 \cdot R}{2 \cdot Z^2} \cdot \frac{(T_1 s + 1)}{(T_0^2 s^2 + 2\xi T_0 s + 1)} \quad (2)$$

где: s - символ операторного изображения Лапласа; $T_0^2 = T^2 / (1 + (T_1 \Omega_1)^2)$ - постоянная времени колебательного звена; $\xi = 1 / \sqrt{1 + (T_1 \Omega_1)^2}$ - коэффициент колебательности; $T_1 = L / R$ - постоянная времени цепи нагрузки, с.

Уравнение (2) включает в себя реальное дифференцирующее звено с постоянной времени T_1 и колебательное звено второго порядка. По выражению коэффициента затухания $\xi = 1 / \sqrt{1 + (T_1 \Omega_1)^2} = \cos \varphi_1$ видно, что переходный процесс активной мощности при скачке напряжения всегда носит колебательный характер ($\xi < 1$), вызван особенностью работы многофазной сети на L-R нагрузку, а колебательность определяется коэффициентом сдвига.

Передаточная функция мгновенной потребляемой суммарной реактивной мощности на симметричную L-R нагрузку равна

$$W_{Q3}(s) = \frac{Q_3(s)}{U_m^2(s)} = \frac{3 \cdot \Omega_1 L}{2 \cdot Z^2} \cdot \frac{1}{(T_0^2 s^2 + 2\xi T_0 s + 1)} \quad (3)$$

описывается колебательным звеном второго порядка и характеризуется меньшей колебательностью по сравнению с активной мощностью.

Таким образом, при питании нагрузки симметричным трехфазным синусоидальным напряжением переходные процессы мгновенных значений суммарной активной и реактивной мощности описываются передаточными функциями второго порядка. В квазиустановившихся режимах мгновенные значения суммарной активной или реактивной мощностей определяются произведением действующих значений первых гармоник напряжения и тока на коэффициент сдвига или на коэффициент реактивной мощности.

Аналогичные результаты по переходным процессам и передаточным функциям получены для двухфазной цепи, в которой напряжения фаз сдвинуты на 90 градусов. Это доказывает, что приведенными передаточными функциями описывается поведение мощностей в многофазных сетях и схемах (двух, трех и более).

Полученные результаты объясняют колебательные переходные процессы в многофазных асинхронных двигателях [3], в схему замещения которых входят только индуктивные и активные сопротивления.

МОЩНОСТИ ИСКАЖЕНИЯ И НЕСИММЕТРИИ

Для примера на рис. 1 приведены переходные процессы мгновенной суммарной активной, реактивной, полной мощности и модуль трехфазного тока при изменении параметров L и R симметричной трехфазной нагрузки.

Расчет переходных процессов выполнялся с применением программного комплекса MATLAB. Расчет фазных токов выполнялся с нулевых начальных условий интегрированием дифференциальных уравнений

$$\frac{di_j}{dt} = \frac{1}{L}(U_j(t) - R \cdot i_j(t))$$

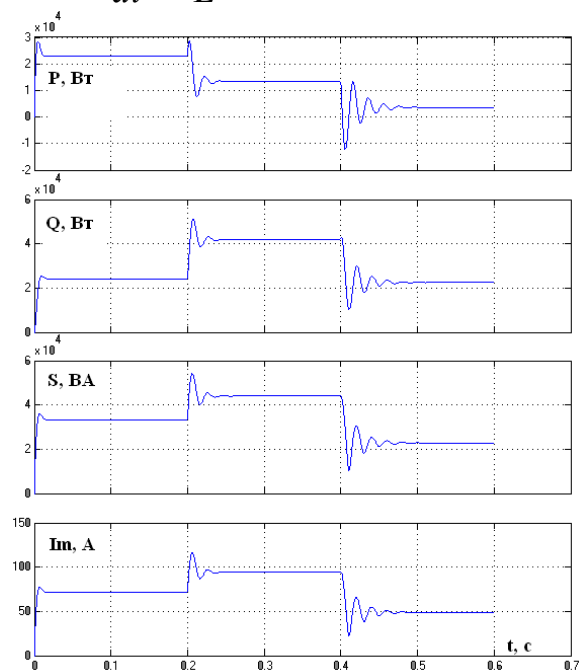


Рис. 1. Переходные процессы мощности и тока при симметричной нагрузке

Суммарные мгновенные активная и реактивная мощности рассчитывались по уравнениям

$$P_3(t) = \sum_{j=1}^3 (u_j(t) \cdot i_j(t)) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t),$$

$$Q_3(t) = -\frac{1}{\Omega_1} \sum_{j=1}^3 (u_j^*(t) \cdot i_j(t)) =$$

$$= -\frac{1}{\Omega_1} (u_a^*(t) \cdot i_a(t) + u_b^*(t) \cdot i_b(t) + u_c^*(t) \cdot i_c(t)).$$

Уравнения, связывающие установившиеся значения исследуемых переменных,

$$X = 2\pi \cdot f \cdot L;$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2};$$

$$\cos \varphi = R / Z;$$

$$T_1 = L / R;$$

$$I_M = U_M / Z;$$

$$S = 3/2 \cdot U_M \cdot I_M;$$

$$P = S \cdot \cos \varphi;$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}.$$

В таблице 1 приведены исходные параметры и расчетные переменные при модуле входного напряжения $U_M = 220 \cdot 1,414$ В.

В моменты времени 0,2 и 0,4 с скачком изменялись параметры LR нагрузки. На рис. 1 четко видно, что повышение колебательности и изменение установившихся значений происходит в соответствии с уравнениями (2), (3) и объясняется уменьшением коэффициента мощности и изменением полного сопротивления нагрузки (табл. 1).

Таблица 1.

Исходные параметры и расчетные переменные

Наименование	Обозн.	Величина		
Активное сопротивление, Ом	R	3	1	1
Индуктивность, Гн	L	0,01	0,01	0,02
Время, с	t	0-0,2	0,2 - 0,4	0,4-0,6
Индуктивное сопротивление, Ом	X	3,1416	3,141	6,283
Полное сопротивление, Ом	Z	4,344	3,297	6,357
Коэффициент мощности	cosφ	0,69	0,303	0,157
Модуль тока, А	IM	71,59	94,33	48,9
Постоянная времени, мс	T1	3,33	10	20
Активная мощность, Вт	P	23043	13333	3581
Реактивная мощность, Вт	Q	24179	41937	22515
Полная мощность, Вт	S	33396	44005	22812

На рис. 2 приведены переходные процессы мгновенной суммарной активной, реактивной, полной мощности и модуль трехфазного тока при изменении параметров L и R , несимметричной трехфазной нагрузки и наличии мощности искажений (присутствие в токе 5, 7, 11 и т.д. гармоник). Во всех переменных четко видно добавление высокочастотных составляющих.

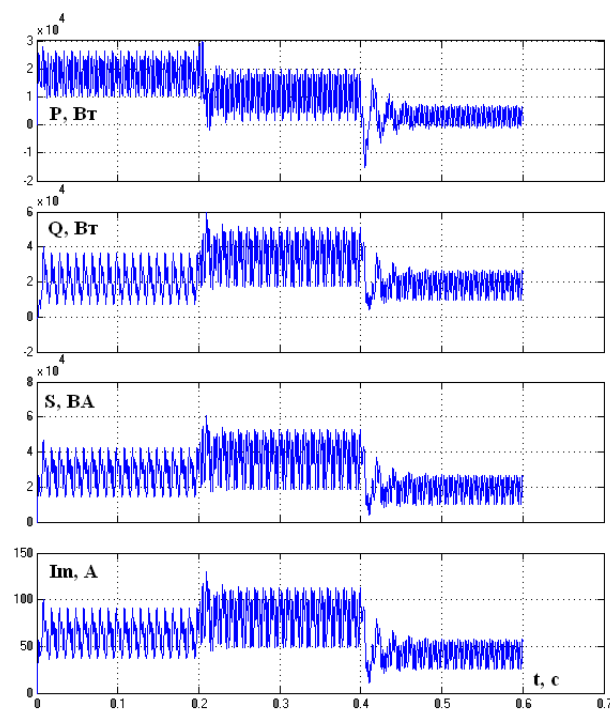


Рис. 2. Переходные процессы мощности при несимметричной нагрузке и мощности искажений

Мощность несимметрии обусловлена разными активными сопротивлениями в фазах и проявилась наличием гармонических составляющих частотой 100 Гц и ниже [4]. Мощность искажения обусловлена силовой схемой электрической цепи (наличие выпрямителя, тиристорного преобразователя,

тиристорного регулятора напряжения и т.д.) и добавляет гармоники частотой 300 Гц и выше [5].

Если зафильтровать высокочастотные составляющие, вызванные наличием мощности искажений, то полученные переменные можно использовать для анализа состояния трехфазной нагрузки, например, определять степень несимметрии активных сопротивлений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены результаты по исследованию поведения мгновенных суммарных активной, реактивной и полной мощностей, а также исследовано влияние мощностей несимметрии и искажения на перечисленные мощности. Предложенные результаты могут быть использованы для оперативной диагностики трехфазной нагрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. - М.: Энергия, 1978. – 320 с.
2. Мощность при переходных процессах в трехфазной LR-цепи / Е.Я.Омельченко // Электрика. -2008. -№ 7.- С. 34-38.
3. Селиванов И.А. Электромеханические свойства асинхронных двигателей / И.А.Селиванов, Е.Я.Омельченко // Вестник. Магнитогорск: МГТУ.- 2011.- №3(35). -С. 35-38.
4. Характеристики крановых электроприводов с несимметричными сопротивлениями в цепи ротора / Е.Я.Омельченко, Р.Р.Сулейманов, С.С. Енин., А.А.Полетаевкин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт Рецензируемое издание № 2189. 2014, № 4. С 20-24.
5. Справочник по преобразовательной технике. Под ред. И.М. Чиженко. К., «Техника», 1978. 447с.